

人口動態の特徴を考慮したエージェントベースの人口推計モデル

○福田純也 喜多一 (京都大学)

Agent-based Population Estimation Model considering Demographic Characteristics

*J. Fukuta and H. Kita (Kyoto University)

Abstract— Population decreases after 2005 in Japan, and the progress of “low birthrate and longevity” cause various problems in each area. The basic data such as future population-by-age composition and household composition play an important role for considering the long-term strategy of investment in lifelines and social infrastructures in these areas. This study propose the construction of population estimation model considering household composition using Agent-based Simulation. The model simulates the demographic change after constituting a household in each agent described as local inhabitants. With this model it is expected that the model reproduce the phenomenon of actual society such as the outflows of the youth to the urban area by modeling “moving in”, and “moving out” as one of the events.

Key Words: Multi-Agent System, Simulation, Population estimation, Population problem

1 はじめに

日本の主な人口問題として「人口減少」と「少子高齢化」が挙げられる。これらの問題は地域によって原因、現状、問題の進展具合が異なっている。例えば、ニュータウン計画により初期入居した世代が高齢化し、いわゆる「オールドタウン」化している問題や、過疎化が進みコミュニティ自体が成り立たなくなる「限界集落」が形成されている問題などが挙げられる。今後そのような地域をはじめとした各地域に電力会社のインフラ設備への投資や、行政による学校施設や病院などの公共施設の社会的投資を検討するにあたり、その地域の将来の世帯構成や年齢別人口構成などの基礎データの将来推計は重要な情報となり得る。

エージェントベースの人口推計モデルについての原らによる研究¹⁾(以下、原モデルと呼ぶ)では、人口推計の手法としてエージェントベースドシミュレーション(以下、ABS: Agent-Based Simulation と呼ぶ)を用いている。ABSは、人や組織をソフトウェアエージェントとして記述し、エージェント間の相互作用を計算することでボトムアップに社会現象をシミュレーションすることが可能であり、モデル化の自由度の高い大規模なシミュレーションへの応用が期待されている。先行研究の目的は、ABSを用いて対象地域の住民をエージェントとして記述し、世帯構成を考慮した人口動態を予測することである。原らの実験では、日本全国の統計データを基にして、人口構成及び世帯構成に沿ってエージェントを配置し、ABSを用いて将来の人口推計を行っている。また、エージェントのイベントとして、各個人の死亡、出生、婚姻、離婚、世帯分離、世帯統合をモデル化している。原らの研究ではその目的として、世帯構成を考慮して対象地域の人口動態を予測することが述べられている。実験では二地域モデルは用いられたが、どちらの地域にも等質で日本全国の統計データを用いており、地域を対象とした人口動態推計は行われていない。さらに、人口学的なイベントに関してもエージェントが自律的に振る舞うモデルとなっていないなどの問題がみられる。

そこで本研究では、原らの研究を踏まえた上で、人

口問題に直面している地域の統計データを用いて当該地域の人口動態の特徴を捉えた人口推計モデルの構築を提案する。また、原モデルの世帯分離・統合のイベントに代えて、地域間の転入・転出イベントを実装することや、婚姻イベントのモデルを改善することも提案する。転入・転出の実装によって地域間の人口移動といった地域毎の人口動態の特徴を捉えた人口推計が可能となり、さらにイベントを自律的なエージェントのモデルに改善することで、より現実的な人口推計が可能となることを期待している。

2 先行研究

2.1 シミュレーションモデル

原らのモデルではエージェント群に対して、加齢、出生、死亡、婚姻、離婚、世帯分離・統合といった人口学的イベントが各発生率に従って発生し、それに伴い人口構成および世帯構成が変化していく。発生率はエージェントの属性(年齢や性別など)によって異なり、公表されている各統計データに基づいている。

加齢、出生、死亡のイベントと比較して、婚姻、離婚、世帯分離・統合のイベントはエージェント(あるいは世帯)間の組合せによるイベントであるため、統計データからそれらのイベントを単純かつ正確に規定することは困難である。そこで、婚姻、離婚、世帯分離・統合のイベントに対して次節で説明する拘束条件付最適化を用いることで、エージェント同士の最適な組合せを探している。

2.2 初期エージェントの属性値及び組合せの決定手法

初期エージェントの属性値及びイベントでの組合せの決定には、池田ら²⁾によって提案された拘束条件付最適化を用いる。年齢別人口分布や夫婦の年齢差の分布などの公表されている各種の統計データやその外挿値を、初期エージェントの属性値及び組合せ決定のための拘束条件とする。この拘束条件の下で属性値をランダムにサンプリングして、拘束条件を満たす範囲で最も発生頻度の高い状態を属性値として採用する。

この拘束条件下でのランダムサンプリングの手法として、構成が簡単で近傍の設計のみで実装できるシミュ

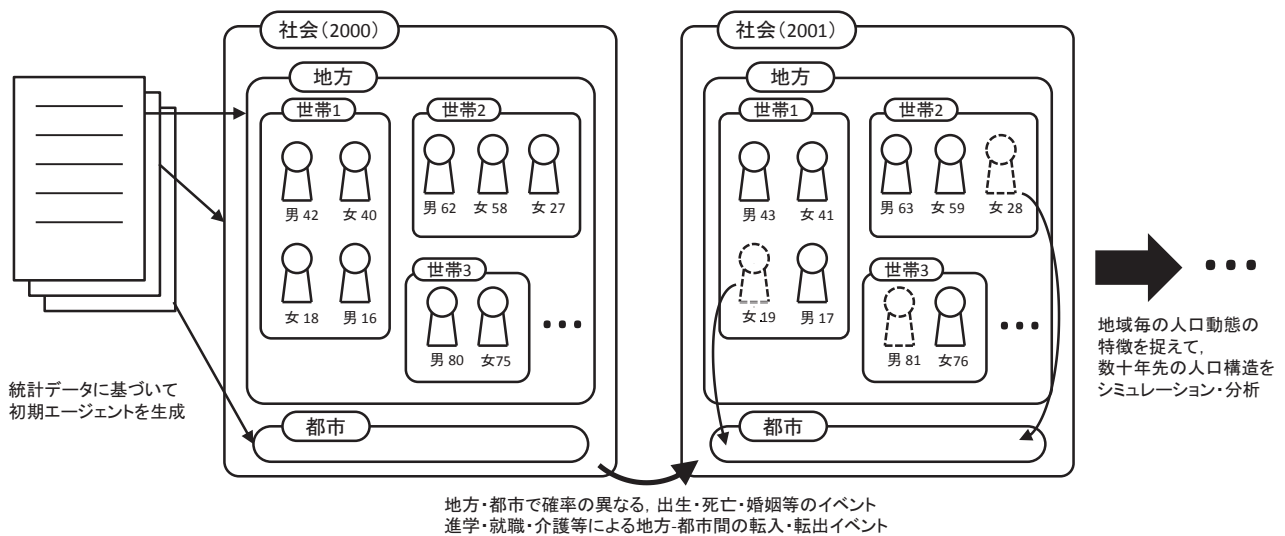


Fig. 1: 提案するシミュレーションモデル

レーテッドアニーリング (以下, SA : Simulated Annealing と呼ぶ) を用いている³⁾.

2.3 アンサンブルシミュレーション

SA による属性値の決定手法では, 取り得る属性値の自由度が高く, 属性値は一意には決まらない. そこで, 「ランダムなサンプリングを行い, 属性値を決定する」という工程を複数回繰り返し, エージェントが構成する仮想世界のアンサンブルを得る. そして, 各仮想社会でシミュレーションを行い, これにより得られた将来の各仮想社会の分布から, 将来予測値を考察する. このような手法をアンサンブルシミュレーションと呼ぶ. 原らの研究では複数回の試行によりアンサンブルシミュレーションを実施している.

2.4 原モデルでの実験

原らは多地域モデルへの動作検証を目的に, 日本全国を等質な二つの地域に分割した二地域モデルに対して, 1995年から2015年までの20年間のシミュレーションをアンサンブルシミュレーションとして10試行した. 1995年から2005年までの10年間の結果を2005年の実際の統計データと比較することでモデルの信頼性を確認し, その後2015年まで将来推計をしている. 一地域の世帯数は2,500世帯で, エージェント数は二地域合わせて11,992としていた. なお, 出生率や死亡率, 婚姻率, 離婚率, その他の各イベントの拘束条件とした統計データ等は基本的に1995年の統計データを採用し, 20年間一定としている.

また, 原らの研究ではアンサンブルシミュレーションの計算量が多いことから, 並列計算によりシミュレーションの高速化を図っている. その方法として, 小野ら⁴⁾によって提供されているJava-based Master Worker library (以下, JMW と呼ぶ) を利用している. JMW は排他制御やスレッドなどの高度な並列プログラミングを深く理解しなくても, グリッド上で並列計算を可能にするライブラリである.

3 原モデルに対する本研究での改善の提案

3.1 地域の特徴を捉えたシミュレーションモデル

原らによる研究では二地域モデルでシミュレーションを行っているが, どちらの地域においても共通して日本全国の統計データを利用していた. 研究の目的とするのは地域毎の人口動態の特徴を考慮した将来の人口推計であるため, 二つの地域でそれぞれ異なる地域を対象とし, 当該地域の統計データを利用してモデルを構築することが望ましい.

そこで本研究では, Fig. 1 のような二地域のシミュレーションモデルを提案する. 一方は近年の人口増減率がマイナスであったり高齢者数が増加傾向であったりするなどの人口問題に直面している地域 (以下, 地方と呼ぶ) を対象とし, もう一方は政令指定都市域 (以下, 都市と呼ぶ) を対象とする. このようにモデルを構築することで, 地方から都市への若者の流出をはじめとした「地方-都市間の転入・転出」という人口問題の代表的な要因が考慮されたシミュレーションを実現することができる. 具体的には, Fig. 1 に示すように, 地方のある世帯では子供が大学進学や就職のために都市へ転出したり, 婚姻によって都市で新たな世帯を形成 (あるいは配偶者の世帯に加入) したり, 高齢の配偶者が死亡して高齢者の単身世帯が形成されたりといった人口・世帯構成の時系列変化を繰り返すことで, 対象の地方に将来起こり得る問題を予測することを目指す.

3.2 エージェントの自律性の考慮

2.2 節で述べたように, 原モデルでは初期エージェントの属性値およびイベントでのエージェントの組合せの決定に拘束条件付最適化を用いており, その拘束条件は各統計データである. 初期エージェントの属性値決定に関しては, シミュレーション開始時にその時点 (先行研究では1995年) のエージェントの属性値を実際の統計データに従って定めておく必要があるため, 拘束条件付最適化を用いるべきである. 一方, イベントでの組合せ決定に関しては, 統計データに従ってエージェントの組合せを決定するため, エージェントは自律的に振る舞うモデルとはなっていない. また, シミュレーションを進めてもモデル内の当該イベントの傾向

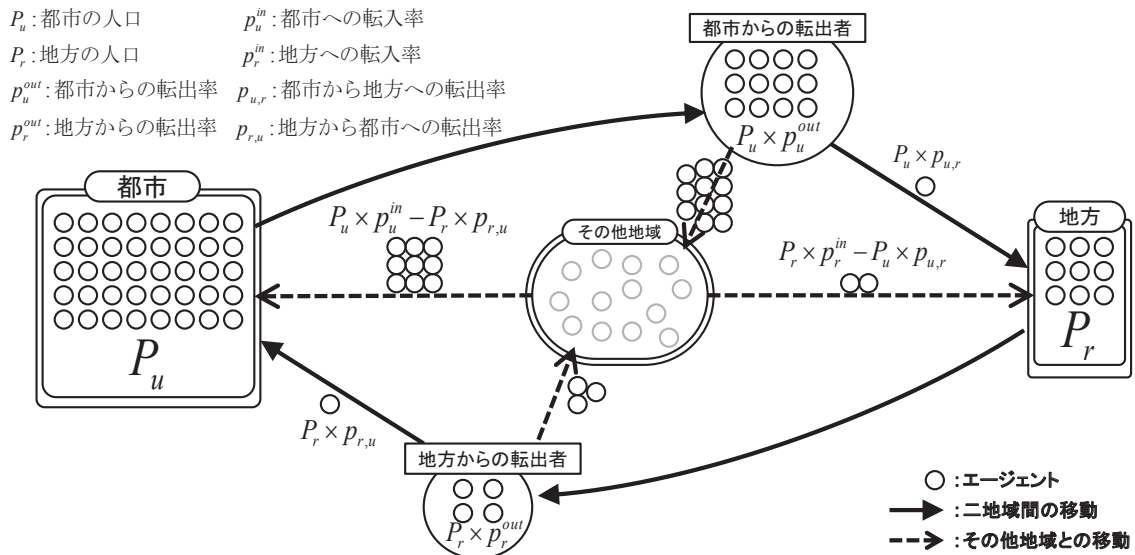


Fig. 2: 転入・転出イベントのモデル図

に変化は見られず、多様なシナリオでの将来推計がなされないといった問題もある。

婚姻イベントを例に挙げると、「男性（女性）の年齢別婚姻率」と「初婚夫妻の年齢差別婚姻率」の統計データが拘束条件となっており、男女のエージェントをランダムに複数組選んで婚姻関係の組合せ集合を作り、複数の組合せ集合の中で統計データから極力外れていない組合せ集合を採用することで組合せ最適化問題を解決している。つまり原モデルでは、独身のエージェントは自ら婚姻相手を選択できず、外からの操作によって統計データに合わせるように婚姻相手が選ばれている。ABSでは、各エージェントの自律的なインタラクションによって社会現象をシミュレーションすることで多様な将来シナリオを具体性をもって想定できる。このため、拘束条件付最適化を用いた組合せ最適化問題としての解法から脱却を図ることが望ましい。マッチングアルゴリズムの一つとして、ゲール＝シャープレーアルゴリズムがある。上手く設計できればエージェントが自律的に振る舞うことのできる婚姻イベントの実現が可能となるが、具体的な方法に関しては検討中である。

また、先行研究では「世帯分離・統合」のイベントによって、進学や介護を理由とした地域間の移動を実現していた。しかし、このイベントにおける世帯の組合せ決定にも拘束条件付最適化を用いているため、世帯人員数別世帯数の割合等はシミュレーションを進めても大きな変化はない。実社会においては、人口減少や少子高齢化に伴い世帯人員数別世帯数の割合は変化するため、別の方法によって地域間の移動を実現することが望ましい。そこで本研究では、先行研究の「世帯分離・統合」イベントに代えて、3.1節で述べた「転入・転出」をイベントとして実装することを提案する。その詳細を次節に示す。

3.3 転入・転出イベント

本節では転入・転出イベントの基礎モデルの実装について述べる。地域の人口増減は、出生と死亡からなる自然増減と、転入と転出からなる社会増減に大別さ

れ、特に社会増減に関しては地域によって転入超過であったり転出超過であったりと、その度合いが大きく異なる。つまり、転入・転出のイベントを正しく実装することで、各地域の社会増減の特徴を捉えた人口推計が可能となる。

ここで、Fig. 1で示したシミュレーションモデルに関して、都市および地方からの転出率をそれぞれ p_u^{out} 、 p_r^{out} とし、同様に都市および地方への転入率をそれぞれ p_u^{in} 、 p_r^{in} とする。また、都市から地方への転出を $p_{u,r}$ 、逆に地方から都市への転出を $p_{r,u}$ とする。各確率は、国勢調査によって公表されている「移動人口の男女・年齢等集計（人口の転出入状況）」から参照した「転入・転出者数」と「同年の人口」とによって算出する。

転入・転出を、都市（人口 P_u ）および地方（人口 P_r ）の二地域モデルで考えると、以下のような二つの実装が考えられる。

1. 都市からは $P_u \times p_u^{out}$ 、地方からは $P_r \times p_r^{out}$ の転出者が発生し、それぞれがもう片方の地域へ転入する。
2. 都市からは $P_u \times p_{u,r}$ 、地方からは $P_r \times p_{r,u}$ の転出者が発生し、それぞれがもう片方の地域へ転入する。

一番目の実装では、両地域のすべての転出者による人口移動が行われるため、都市から発生した数万人もの転出者がすべて地方へ転入することになり、実社会とはかけ離れた想定となってしまふ。また、二番目の実装では、都市-地方間のみ転入出による人口移動が行われるため、都市から地方への転出者を見ると数十人程度のみとなっており、こちらも実社会とはかけ離れている。

そこで、実社会と合うように二地域以外の地域との転入出を考慮させると以下ようになる。

3. 都市からは $P_u \times p_u^{out}$ 、地方からは $P_r \times p_r^{out}$ の転出者が移動し、その中からそれぞれ $P_u \times p_{u,r}$ 、

$P_r \times p_{r,u}$ だけもう片方の地域へ転入する。残りの転出者は他地域へ転出する。また、都市および地方には他地域からそれぞれ $P_u \times p_u^{in} - P_r \times p_{r,u}$ 、 $P_r \times p_r^{in} - P_u \times p_{u,r}$ の転入者が移動してくる。

上述の実装によって実社会と合うような人口移動を実現できることが考えられるが、他地域へ転出するエージェントの扱いに注意する必要がある。例えば、都市から別の都市へ進学して、就職の際に再び元の都市へ戻ってくる学生がいた場合、一度都市から他地域へ転出して、その後都市へ転入してくることになる。つまり、他地域へ転出したからといってエージェントを消去するのではなく、他地域でそのエージェントを保持させておく必要がある。

この問題への対応として、「都市」と「地方」に加え、「その他地域」をモデルに組み込むことを考える。このモデルによる転入・転出イベントのイメージ図を Fig. 2 に示す。「その他地域」に関しては、本来であれば日本の人口に相当する割合のエージェントを設置することが望ましいが、計算時間が急激に増加するため、転出者の中から一部のみを保持しておけば良い。一方で、Fig. 2 において、「その他地域」から「都市」「地方」にエージェントが転入しているが、その分のエージェントを「その他地域」で常に保持しておくことは計算時間の増加につながってしまう。そのため、実際は転入・転出イベントの際に必要な転入エージェント分だけ初期エージェントを生成し、シミュレーション開始時と同様に拘束条件付最適化を用いて属性値を決定した後、当該地域へ転入させるといった方法を想定している。

本研究で重要なのは都市と地方の二地域であり、言い換えれば、日本全国の人口動態の中で特定の二地域（地方および都市）にのみ注目している状態である。「その他地域」でも加齢、出生、死亡などの各イベントは起き得るが、統計データは日本全国のデータを用いれば良い。

上述した転入・転出イベントのモデルは基礎モデルであり、改良の余地は多く存在する。例えば、男女別、5歳階級別、理由別などで分類された人口移動の統計データをモデルに取り入れることである。特に、転入・転出といった人口移動は、それぞれ何かしらの理由を持っているはずである。移動理由に関して、国立社会保障・人口問題研究所によって調査⁵⁾されており、「学業」「就業」「婚姻」「家庭」などの移動理由別の割合が、5歳階級別で公表されている。ただし、地域別のデータは存在しておらず、ある地域では学業（進学・入学など）の移動理由の割合が高い、といった地域の人口動態の特徴を捉えることは難しいことが想定される。また、特定の地域間の転入出に関する統計データに関しても、市区町村間の統計データでは十分なデータが得られないこともあるため、転入・転出のイベントを正確に実装するのであれば、都道府県を対象とする必要もある。

3.4 統計データの時系列変化

先行研究では、統計データは基本的に1995年の統計データで20年間一定としているが、実社会では毎年これらの統計データは変動し、その変動の振る舞いは地域によっても異なることが考えられる。将来の各イ

ベントの確率を正確に予測することは難しいが、例えば過去数十年分の実際の統計データの時系列変化から、将来の変化を近似式として求めて、その近似式に基づいて将来の各イベントの確率を算出する方がより実社会に近いシミュレーションが可能になると考えられる。特に近年では、晩婚化・未婚化や単身世帯の増加が著しく、この類のトレンドは人口問題にとって非常に重要である。このような重要な要因に関しては、例えば「晩婚化・未婚化が急激に進行した場合」といったような一つのシナリオを立てて人口推計を行い、その危険性を示すことも人口学的には有用だといえる。

4 実験環境

本研究では、2000年から2010年までの10年間のシミュレーションを行いモデルの信頼性を確認する。モデルの信頼性が確認できたら、さらに2040年程度までシミュレーションを進め、人口推計を行う。

また、エージェント数は実社会の50分の1程度の規模で、乱数系列を変えて10試行のアンサンブルシミュレーションを行うことを想定している。また、シミュレーションの計算には時間がかかることが先の研究から明らかになっているため、先行研究と同様にJMWを利用し、アンサンブルシミュレーションを並列計算することによって、計算の高速化を図る。

5 おわりに

本稿では、対象地域の将来の人口推計を行うことを目的として掲げた。そしてそのために先行研究の改善すべき点を挙げ、その改善方法を提案した。改善点として、シミュレーションモデルで地方と都市を対象地域とすることや、イベントを改変することでエージェントの自律性を向上させること、転入・転出イベントを実装して対象地域における社会増減の特徴を捉えることなどを述べた。

今後の課題として、これらの改善方法をさらに検討していくことが必要である。現時点では先行研究の問題点を言及するに留まっているものもあり、実装の実現可能性を見据えつつ、より具体的な解決方法を模索していく。

参考文献

- 1) Hara, Kita, Ikeda, Susukita : Configuring Agent's Attributes with Simulated Annealing, The Seventh International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (2012)
- 2) 池田, 喜多, 薄田 : 地域人口動態シミュレーションのためのエージェント推計手法, 計測自動制御学会 システム工学部研究会 (2010)
- 3) 喜多 : シミュレーテッドアニーリング, 日本ファジィ学会誌, Vol.9-No.6, 870/875 (1997)
- 4) 小野, 濱田, 寺野, 岡本, 倉橋 : プロダクションクラスター利用型グリッドのためのGAフレームワーク/実行環境の提案, 計測自動制御学会システム 情報部門学術講演会 2009 講演論文集 (2009)
- 5) 国立社会保障・人口問題研究所, 2011年社会保障・人口問題基本調査, 第7回人口移動調査 (2011)